

信息物理融合系统(CPS)研究综述

黎作鹏 张天驰 张菁

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘要 信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)是将计算资源与物理资源紧密结合与协调的产物,它将改变人类与物理世界的交互方式。作为物联网的演进,CPS 已经引起了国内外相关科研机构、政府部门和社会的广泛关注。介绍和阐述了 CPS 的定义、系统结构和特性,重点研究和讨论了 CPS 的理论技术体系、对计算机科学领域带来的重大挑战以及研究现状,最后展望了 CPS 的研究动向。

关键词 信息物理融合系统,计算资源,物理资源,物联网

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Survey on the Research of Cyber-Physical Systems(CPS)

LI Zuo-peng ZHANG Tian-chi ZHANG Jing

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Cyber-Physical Systems(CPS) refers to the tight conjoining of and coordination between computational and physical resources, and will change the way in which we interact with the physical world. As the evolution of Internet of Things, CPS has attracted extensive attention of research institutions, government departments and community in china and abroad. This survey introduced and described the CPS of definition, system architecture and features, in addition, mainly studied and discussed the CPS of theory and technology hierarchy, the important challenges toward computer science technology and situation of researches, finally the future perspective of research trends was presented.

Keywords Cyber-physical systems, Computation resources, Physical resources, Internet of things

1 引言

应用需求、科学技术创新和理论研究的深入为一项新的科学研究与工程应用领域奠定了基础,这就是信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)。未来 CPS 将广泛应用于重要基础设施的监测与控制、国防武器系统、环境监测、智能家居与生活辅助、航天与空间系统、医疗保健和智能高速公路等诸多领域。CPS 的影响将会远远超越 20 世纪的 IT 革命^[1],就像 Internet 改变了人与人交互的方式一样,CPS 的出现将改变人与物理世界交互的方式^[2]。

2006 年 2 月,美国科学院发布的《美国竞争力计划》将 CPS 列为重要的研究项目。2007 年美国科学技术顾问委员会(PCAST)提交的报告《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》中,提出了美国信息技术领域的 8 个重要领域,其中 CPS 居首位。

我国对 CPS 研究也非常重视,《国家重点基础研究发展规划、国家重大科学研究计划 2010 年重要支持方向》中包含了“物联网的演进”——Cyber-Physical Systems。在 2010 年 1 月 15 日,国家 863 计划信息技术领域专家组在上海举办了“信息物理融合系统 CPS 发展战略论坛”,深入讨论了 CPS 的

科学基础及相关技术和国民经济领域的相关应用等方面的问题。

本文首先介绍和阐述 CPS 的定义、系统结构和特性,并重点研究和讨论 CPS 的理论技术体系、CPS 为计算机科学领域带来的重大挑战和研究现状,最后阐述对 CPS 的研究展望。

2 CPS 概述

2.1 CPS 的定义

信息物理融合系统(CPS)是通过计算(Computation)、通信(Communication)与控制(Control)技术的有机与深度融合,实现计算资源与物理资源的紧密结合与协调的下一代智能系统。

在微观上,CPS 通过在物理系统中嵌入计算与通信内核实现计算进程(Computation Processes)与物理进程(Physical Processes)的一体化。计算进程与物理进程通过反馈循环(Feedback Loops)方式相互影响^[3],实现嵌入式计算机与网络对物理进程可靠、实时和高效的监测、协调与控制。

在宏观上,CPS 是由运行在不同时间和空间范围的分布式的、异步的异构系统组成的动态混合系统,包括感知、决策

到稿日期:2010-08-26 返修日期:2010-11-12 本文受国家 863 高新技术研究发展计划(2007AA01Z401),国家自然科学基金(90718003, 60973075)资助。

黎作鹏(1979—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为信息物理融合系统、无线传感器网络,E-mail: lizuopeng@hrbeu.edu.cn;张天驰(1990—),男,主要研究方向为物联网、生物信息学;张菁(1965—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、虚拟现实。

和控制等各种不同类型的资源和可编程组件。各个子系统之间通过有线或无线通信技术,依托网络基础设施相互协调工作,实现对物理与工程系统的实时感知、远程协调、精确与动态控制和信息服务。

2.2 CPS 的系统结构

2.2.1 CPS 的基本功能逻辑单元

CPS 的基本组件包括传感器(Sensor)、执行器(Actuator)和决策控制单元(Decision-making Control Unit)。传感器是一种嵌入式设备,能够监测、感知外界的信号、物理条件(如光、热)或化学组成(如烟雾);执行器是一种嵌入式设备,能够接收控制指令并对受控对象施加控制作用;决策控制单元是一种逻辑控制设备,能够根据用户定义的语义规则生成控制逻辑。

基本组件结合反馈循环控制机制^[4](见图 1)构成了 CPS 的基本功能逻辑单元,执行 CPS 最基本的监测与控制功能。如图 2 所示,传感器与执行器是物理和计算世界的接口,决策控制单元根据控制规则部署监测任务;传感器将感知信息反馈给决策控制单元,作为控制规则算法的输入经过计算得到控制指令;执行器根据控制指令操控物理对象。

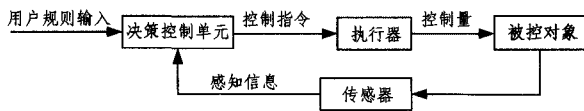


图 1 CPS 的反馈环

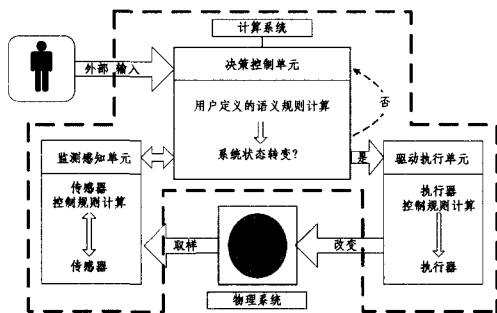


图 2 CPS 的基本功能逻辑单元

2.2.2 CPS 的体系结构

CPS 是运行在不同的时间和空间范围的闭环(多闭环)系统,而且感知、决策和控制执行子系统大多不在同一位置。逻辑上紧密耦合的基本功能单元依托于拥有强大计算资源和数据库的网络基础设施(如 Internet、数据库/知识库服务器和其他类型数据传输网络等),构成了 CPS 完整的体系结构,使我们能够实现本地或者远程监测和影响物理环境。通过对文献[5,6]的深入研究,本文给出了 CPS 体系结构的一般形式描述(见图 3),它由决策层、网络层和物理层组成。决策层通过语义逻辑计算实现用户、感知和控制系统之间的逻辑耦合;网络层通过网络传输计算连接了 CPS 在不同空间与时间的子系统;物理层是 CPS 与物理世界的接口,体现的是感知与控制计算。

在现实环境中,大量的传感器以无线通信方式自组织成网络,协同完成对物理环境或物理对象的监测感知。传感器网络对感知数据做进一步的数据融合处理,将得到的信息通过网络基础设施传递给决策控制单元;决策控制单元与执行

器通过网络化分别实现协同决策与协同控制。

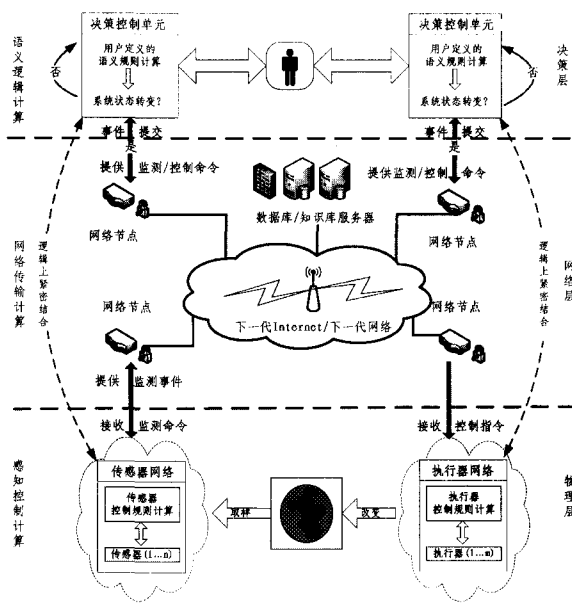


图 3 CPS 的体系结构

2.3 CPS 的特性

CPS 具有与传统的实时嵌入式系统和监控与数据采集系统(Supervisory Control And Data Acquisition Systems, SCADA)不同的特殊性质。

(1)全局虚拟(Globally Virtual)、局部物理(Locally Physical)性:局部物理世界发生的感知和操纵,可以跨越整个虚拟网络被安全、可靠、实时地观察和控制。

(2)深度嵌入(Deeply Embedded)性:嵌入式传感器与执行器使计算被深深地嵌入到每一个物理组件,甚至可能嵌入进物质里^[7],使物理设备具备计算、通信、精确控制、远程协调和自治 5 大功能,更使计算变得普通了,成为物理世界的一部分。

(3)事件驱动(Event Driven)性:物理环境和对象状态的变化构成 CPS 事件,触发事件→感知→决策→控制→事件的闭环过程,最终改变物理对象状态。

(4)以数据为中心(Data-Centric):CPS 各个层级的组件与子系统都围绕数据融合(Data Fusion)向上提供服务,数据沿从物理世界接口到用户的路径上不断提升抽象级,用户最终得到全面的、精确的事件信息。

(5)时间关键(Time-Critical)性^[8]:物理世界的时间动态是不可逆转的,应用对 CPS 的时间性(Timeliness)提出了严格的要求,信息获取和提交的实时性影响到了用户的判断与决策精度,尤其是在重要基础设施领域。

(6)安全关键(Security/Safety-Critical)性:CPS 的系统规模与复杂性对信息系统安全提出了更高的要求^[9],更重要的是需要理解与防范恶意攻击通过计算进程对物理进程(控制)的严重威胁^[10],以及 CPS 用户的被动隐私暴露等问题。CPS 的安全性必须同时强调系统自身的保障性(Safety)、外部攻击下的安全性(Security)和隐私(Privacy)。

(7)异构(Heterogeneous)性:CPS 包含了许多功能与结构各异的子系统,各个子系统之间要通过有线或无线的通信方式相互协调工作^[11]。因此 CPS 也被称为混合系统(Hybrid

Systems)或者系统的系统(Systems of Systems)。

(8)高可信赖(Highly Dependable)性:物理世界不是完全可预测和可控的,对于意想不到的条件必须保证CPS的鲁棒性^[12](Robusness);同时系统必须满足可靠性(Reliability)、效率(Efficiency)、可扩展性(Scalability)和适应性(Adaptivity)。

(9)高度自主(Highly Aotonomous)性^[13]:组件与子系统都具备自组织(Self-orgnizing)、自配置(Self-configuration)、自维护(Self-maintenance)、自优化(Self-optimization)和自保护(Self-protecting)能力,支持CPS完成自感知(Self-sensing)、自决策(Self-determination)和自控制(Self-control)。

(10)领域相关(Domain-Specific)性^[14-20]:CPS的研究必须着眼于工程应用领域,诸如汽车、石油化工、航空航天、制造业、民用基础设施等,要着眼于这些系统的容错、安全、集中控制和社会等方面会如何对它们的设计产生影响。

3 支撑CPS的理论技术体系

CPS是处于物理、生物、工程和信息科学的交叉领域的新学科^[21]。CPS的理论技术体系可以层次化表示为感知与控制技术、传输理论与技术、支撑理论与技术和应用技术,如图4所示。其中最重要的包括计算理论与技术、网络传输技术、传感器网络与普适感知技术等。

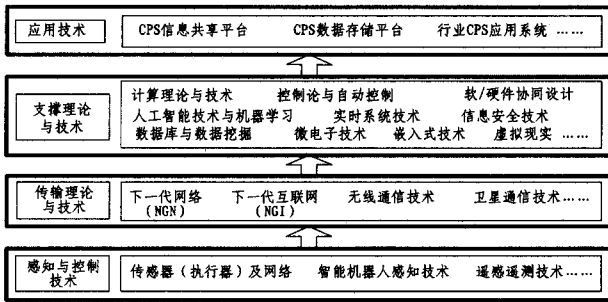


图4 CPS的理论技术体系模型

3.1 计算理论与技术

计算理论与技术的成熟与丰富成果是CPS实现的基础。主要的计算技术包括普适计算(Pervasive/Ubiquitous Computing)、嵌入式计算(Embedded computing)、分布式计算(Distributed Computing)和云计算(Cloud Computing)、移动计算(Mobile Computing)、自律计算(Autonomic Computing)和可信计算(Trusted Computing)等。普适计算^[22]体现了信息空间与物理空间的融合,与CPS从设计目的到工作模式都非常相似;嵌入式计算与控制的概念结合在一起,通过嵌入到物理系统中,实现“环境智能化”^[23];分布式计算是将复杂的问题分配给许多计算机解决,实现了计算资源共享和平衡计算负载;云计算^[24]是分布式计算发展的新计算模式,将计算、数据和应用等资源作为服务通过互联网提供给用户;自律计算也称为自主计算,通过自配置、自恢复、自优化和自保护机制,解决物理环境的不确定性和不可控的条件对CPS的不利影响^[25];移动计算实现了计算机与其他的智能信息设备在无线环境下的数据传输和资源共享^[26];可信计算在计算和通信系统中广泛使用基于硬件的安全模块,从全新的观点解决计算的安全问题。

3.2 网络传输技术

以计算机和通信技术为基础的传输网络是实现CPS的Globally Virtual,Locally Physical特性的重要基础设施。下一代互联网(NGI)和下一代网络(NGN)将为CPS发挥重要的支撑作用。作为NGI核心的IPv6技术,提供了丰富的地址资源,使众多的物理对象的网络化互联成为可能^[27];基于软交换技术的NGN是能够提供数据、语音和视频多媒体技术的电信网络^[28]。另外,广域的测试平台GENI将有助于下一代CPS的网络协议的试验^[29]。

3.3 传感器网络与普适感知技术

大量的传感器以无线通信的方式自组织成网络,协作地感知、采集和处理物理对象的信息,称为无线传感器网络^[30,31](Wireless Sensor Networks, WSNs)。WSNs的研究得到了广泛的关注,目前在网络协议、能量管理、数据融合与安全性等方面已经取得了非常丰富的研究成果。嵌入式传感器与传感器网络技术的成熟与广泛应用使对物理环境的无处不在的感知(普适感知)成为现实。

在CPS环境下,出现了新一代的传感器网络技术,即WSANs(Wireless Sensor and Actuator Networks),特征是传感器和执行器并存^[32]。WSANs是一个被动的信息采集基础设施;由于不仅能够监测,也能够操控物理世界的行为,因此WSANs具有主动性的特征。

综上所述,目前在很多相关领域里的技术与创新的快速发展奠定了CPS的基础,但是这并不意味着在此基础之上CPS就可以完全实现或者易于实现,因为由于CPS的特殊性,科学研究领域还面对着许多重大的挑战。

4 重大挑战与研究现状

4.1 CPS面对的重大挑战

与物理世界的深度融合以及系统的规模(时间与空间)与复杂性是CPS为计算机科学领域带来挑战的根本原因。

(1)基础分歧:计算机科学建立在离散数学基础之上,而工程以连续数学为主。如何实现离散的、异步的计算进程与连续的、同步的物理进程的紧密结合,是CPS研究的根本性挑战。

(2)缺乏协同分析与协同设计:目前计算机硬件与软件、计算系统与物理系统的评估、建模与仿真都采用分离的方式完成,缺乏必要的协同设计(Co-design)与协同分析(Co-analysis)。硬件与软件分离导致约束过度(Over-constraining)或约束不足(Under-constraining),难以评估设计决策的影响;计算系统与物理系统分离导致不能完全地捕捉到这些系统之间的相互依赖性,理解这些依赖性精确表示和建模CPS的关键前提^[33]。

(3)系统设计与验证的挑战:由于CPS包含了不同的物理和计算组件及系统之间的交互,因此在鲁棒性、可靠性、效率和实时性方面的系统设计成为一个关键问题,并且由于系统复杂性的增加,所需的开发时间成指数增长。CPS的模型包含了硬件、软件和物理环境的各种细节以及不同系统的异构性,导致了状态空间膨胀(State Space Explosion),为系统验证带来了巨大的挑战^[34],极大地增加了验证成本。

(4)计算的核心抽象缺少时间语义:目前计算机领域里所有有较高级别的抽象中都隐藏时间性(Timing),程序的执行是不可预测的,尤其是在复杂的CPS中。但是由于CPS要实现计算与物理世界的直接交互,因此不能将时间抽象分离。目前的嵌入式系统架构中,指令集架构(ISA)可以在软件设计中隐藏硬件的实现细节,但不能保证时间性能;最差情况执行时间(WCET)和实时操作系统(RTOS)都需要大量的平台测试(Bench Test)。而且,WCET是一个渐增的难题,当处理器架构为了处理深度流水线、分级存储器体系而开发更复杂的技术时,WCET是不可知的;系统复杂性的增加导致RTOS里的时间行为不精确,并越来越不可控制。文献[35]认为“要充分地开展CPS的潜能,需要重新思考计算的核心抽象”。

(5)网络阻碍CPS的实时运行:目前通用的网络技术(如TCP/IP)是基于Best-effort思想建立的,对于高实时性要求的CPS应用,很难实现可预测性的保证。由于通信网络存在各种复杂因素,例如拥塞和信道质量造成了传输延迟、延迟抖动^[36]和丢包,严重阻碍了CPS的数据包的实时传送。最终不可预测的传送时间能够影响被控物理系统的性能,甚至导致物理系统的不稳定。

(6)安全性的挑战:CPS的特性为信息安全带来了许多新的问题:①如何保证CPS在遭到恶意攻击时的实时性需求;②如何处理针对控制环的恶意攻击;③CPS为信息安全引入了物理因素,比如以物理进程为目标的攻击。更重要的是,如果攻击者成功地利用了CPS的控制能力,后果将非常严重。现有的计算机安全技术还没有足够的力量保证CPS的安全性。

(7)缺乏对数据融合的支持:未来CPS的全球化、自主的网络架构需要能够容纳大量的物理数据源、执行器和分布的计算元素,所以需要以数据融合与提升信息抽象能力为中心,以满足应用需求。目前的Internet架构是优化的端到端通信,不是以数据融合作为目标。目前的编程语言也缺乏相应支持,既不适合分布式数据融合,也不适合使用高层信息(如数据融合)的复杂分布的、高度自主的决策和控制系统。

综上所述,CPS为计算机科学的基础学科、关键领域和应用技术都带来了重大挑战。解决这些挑战,需要计算机科学相关领域的大力与深入的研究。

4.2 研究现状

尽管CPS已经引起了国内外的广泛关注,但是因为相关研究刚刚起步,目前所取得的研究成果还非常有限。目前相关研究主要集中在系统建模、系统验证、中间件、网络技术与安全性等领域。

系统建模主要包括(1)环境模型:为了控制与物理环境的交互,需要建模,以表示物理环境的特性。文献[37]依据随机依赖性和Markov过程,提出了推理环境不确定性的模型。文献[38]将Hilbertian形式化方法与代数模型相结合来建模物理关系;(2)事件模型:CPS的系统组件和设计原则应该用基于事件的方法审视。文献[39]提出了Lattice-based事件模型,它包括事件类型、外部和内部属性3个组件。文献[6]介绍了时间-空间事件模型,它依靠分层结构扩展事件的时间-空间关系,捕捉CPS中计算和物理世界间的紧密关联;(3)服

务模型:文献[40]扩展传统的面向服务(SOA)模型,包括连接不同物理实体(基于服务)的PE-ontology模型和服务规范模型PE-SOA。文献[41]基于OWLS模型(服务描述模型)开发了环境敏感面向资源的服务模型,包含一个资源自动调度架构,以满足实时和物理资源约束;(4)时间行为模型:文献[42]将基于Duration Calculus的时间语义加入架构分析和设计语言中来建模系统(软件与硬件)的时间行为。

系统验证主要解决状态空间膨胀问题。文献[34]提出一个系统设计方式Interruptible RPC:通过提供有限的异步性,限制异步通信导致的信息交叉,预防了状态膨胀。文献[43]提出了一个CPS自动抽象模型方法:将用户定义的汇编代码语言自动地编译进LHPN模型,通过LHPN转换来降低模型复杂性,最终降低状态空间。

中间件技术主要研究解决Feature-richness过多占用资源的问题。文献[44]基于面向特征软件开发(FOSD)原则,用基于特征的高层抽象来推断当前中间件的代数结构,系统化地将通用中间件转化为满足CPS不同应用的需求。由于现有的中间件技术缺乏支持有不同应用语义需求的CPS,文献[45]开发了可配置中间件服务,以支持处理周期性和非周期性事件。

传输协议、拥塞控制和QoS管理是针对CPS相关网络技术的研究。文献[46]为数据采集的CPS传感器网络设计了新的传输协议,协议根据被传送时-空数据的重要性调整传输的可靠性,并从节点到基站聚合数据,有效地降低了能耗和带宽。文献[47]提出了分布式联合拥塞控制和信道管理算法,它通过拉格朗日双向分解解决网络功效最大化问题(MIN-LP)。文献[48]针对物理数据的重要性重新定义了无线传感器网络拥塞控制功能,不同粒度的时间与空间摘要作为控制数据传输率的工具,以消除拥塞。文献[49]讨论了CPS网络的QoS管理问题,认为CPS本质是面向应用的,因此必须强调满足不同应用的不同QoS需求。

安全性主要研究解决恶意攻击下的实时控制、故障传播、加密技术、机密性和自我诊断(Self-diagnostics)等问题。文献[50]描述了基于控制理论的被动性概念,实现了在恶意攻击下系统的弹性控制。文献[51]通过静态分析,结合WCET安全地约束代码的执行时间,如果执行时间高于界限,则提供系统故障指示。文献[52]提出了单纯型参考模型,以帮助开发者开发有限故障传播的CPS架构。文献[53]面向移动无线CPS提出基于双线性Diffie-Hellman假设的有效无证书方案(McCLS),解决了加密成本与密钥管理的复杂性问题。文献[54]将时间性引入到机密决策中,使用形式化信息流模型描述在模型CPS里的信息泄露。文献[55]提出了漏洞评估架构,用以有效地评估系统漏洞。文献[56]提出了一个自适应的系统健康监测与管理技术(HMM)系统模型,它定义了故障诊断质量标准并支持诊断需求规范,以满足复杂CPS的高可靠性和安全性需求。

另外,文献[33]研究了可信性量化建模,通过对计算和物理要素的协同分析,建立对可信性的量化理解;文献[32]为CPS提供了基于组的编程抽象,将只关注单一的无线传感器网络的编程抽象提升到了复杂系统的系统;文献[57]研究了

CPS的自律计算技术;文献[58]提出了自顶向下的方法定制软件架构,以支持反馈控制规则和软件验证;文献[59]至文献[61]从CPS的WSNs的能耗角度出发研究了电池模型、分簇算法和优化节点选择问题。

综上所述,目前的成果只能在CPS的局部功能研究上有所突破,更重要的是目前仍然缺乏实现CPS的科学基础和工程原理,所以仍难以满足实现CPS的需求。

5 CPS的研究展望

目前发展仍受多方面的阻碍与制约,未来要充分发挥CPS的潜能,需要包括计算机科学在内的诸多领域深刻的变革与进步。本文初步展望计算机相关学科在CPS环境下的研究动向。

(1)系统设计与建模:与物理世界的深度融合为CPS的系统设计与建模提出了以整体的观点看待复杂系统的新方式^[7],即物理对象、计算机硬件/软件的协同分析与协同设计。

(2)系统架构:CPS需要具备开放的、灵活的和可扩展的系统架构,并要能够更好地发挥在硬件和软件方面的技术进步的作用。(a)分层的CPS架构:借鉴Internet的成功经验,并结合嵌入式、自主的CPS的渐趋分布性而开发分层架构。分层架构应包括一个以信息为中心的协议栈,支持数据融合,使进入网络的原始数据能通过提升信息抽象而逐步地转换成应用领域相关的高层信息;(b)基于组件的CPS架构:因为与物理世界的紧密结合,所以CPS的架构需要灵活地支持领域相关性。在基于组件的架构里,硬件、软件和物理实体都表示为系统组件。简单组件构成组合式组件,高层的组合式组件封装低层组件。低层的组件表现出局部不同的执行与接口语义,而高层组合式组件表现出全局统一的语义。

(3)计算模式:未来的CPS计算模式需要能够方便地表示外部环境,能够对与物理世界间复杂的、大规模的分布并行交互做出抽象。例如未来的面向对象编程系统需要逻辑抽象地表示环境中的物理对象。逻辑对象能够封装相应物理实体的状态,并需要隐藏分布式环境下复杂的状态评估细节。

(4)网络技术:目前的网络技术难以保证可预测性,因此在网络的设计与实现中需要加入时间性语义,例如在流量控制和拥塞控制上要着重对时间性要素做出综合考量。另外,由于CPS将数据融合和数据存储作为网络功能的核心,因此需要从这个角度重新思考网络协议。

(5)软件工程:由于CPS集成了越来越多的大量组件,并且异构网络之间的互联性逐渐增强,以及更多地依赖分布式信息处理方式,导致系统出现更多的功能性和时间性故障。未来的软件工程需要在出现系统故障和软件集成错误时保证系统的鲁棒性、正确性、可预测性和安全性,能够对分布式环境中的CPS提供有利的支持。

(6)编程语言:新的CPS编程语言需要能够处理计算与物理资源之间的复杂交互,能够处理非结构化数据并适应对反应能力的严格需求。新编程语言的抽象应该直接以环境因素为中心(比如物理对象、事件和数据源),并在最高层的抽象里要明确地支持对环境不确定性的表示。

(7)信息安全:要解决系统在攻击下的实时工作问题,

CPS的信息安全技术要包含可生存性(Survivability)要素^[62],即系统在受到攻击时,CPS具有适度地降低(Graceful Degradation)运行目标的能力。对物理对象的监测同时也提供了隐私暴露的机会。用户的隐私暴露是一个被动性的问题,需要开发保护隐私的匿名技术。CPS的安全与隐私机制必须作为未来架构的一个组成部分,而不是后补充。

(8)传感器网络:CPS环境下的传感器数据具备时间与空间意义,时空性直接决定用户评估物理现象的精度,因此传感器网络的协议需要针对CPS的特性做出新思考,例如针对时空性对传感器数据的重要性,开发能够隐藏时间、路由与网络拓扑的方法;传感器网络的成熟技术可以应用到执行器,但执行器由于具有更强的计算和通信能力,因此能耗高于传感器,所以需要为执行器网络开发相关的数据链路层协议和能量管理技术。

结束语 信息物理融合系统(CPS)是能够改变人与物理世界交互方式的下一代智能系统,它将实现计算资源与物理资源的紧密结合与协调。目前我国对物联网的研究高度重视,作为物联网的演进,CPS应该得到更加广泛的关注。本文对CPS的研究与进展进行了综合性的论述,介绍了CPS的定义、系统结构和特性,并重点从技术角度研究和讨论了CPS的理论技术体系、面对的重大挑战和研究现状,最后对未来CPS的相关研究进行了初步的展望。

CPS具有巨大的经济潜力和社会影响力,对国家安全和竞争力具有重要意义。鉴于目前CPS相关研究刚刚起步,相关研究成果有限,并且仍然缺乏科学基础和工程原理,在未来需要通过计算机科学、物理领域和众多相关学科领域的科学家、专家和工程师的全面努力,加快和促进CPS的研究与发展,最终实现人类与物理自然界相互协调与融合的愿景。

参考文献

- [1] Christophe T, Chen Yang-quan. Optimal Mobile Actuator/Sensor Network Motion Strategy for Parameter Estimation in a Class of Cyber Physical System[C] // Proceedings of the American Control Conference. 2009;367-372
- [2] Rajkumar R, Lee I. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution[C] // Proceedings of the Design Automation Conference. 2010;731-736
- [3] Lee E A. Cyber-Physical Systems-Are Computing Foundations Adequate[C] // Position Paper for NSF Workshop on Cyber Physical Systems; Research Motivation, Techniques and Roadmap. 2006
- [4] Tabuada P. Cyber-Physical Systems; Position Paper [C] // Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. 2006
- [5] Tan Ying, Goddard S. A Prototype Architecture for Cyber Physical Systems[J]. SIGBED Review, 2008
- [6] Tan Ying, Vuran M C, Goddard S. Spatio-Temporal Event Model for Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. 2009;44-50
- [7] Kim J E, Mosse D. Generic Framework for Design, Modeling and Simulation of Cyber Physical Systems[C] // Position Paper for

- [8] Williams R D, Dugn J B. Cyber-Physical Systems; Timing is (almost) everything[C]// Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. 2006
- [9] Akella R, McMillin B M. Model-checking BNDC properties in Cyber-physical systems[C]// Proceedings of International Computer Software and Applications Conference. 2009; 660-663
- [10] Gaddam N, Kumar G S A, Somani A K. Securing Physical Processes Against Cyber Attacks in Cyber-Physical Systems[C]// Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. 2006
- [11] Woo H, Yi Jian-liang. A Simulation Framework for PSoC Based Cyber Physical Systems[C]// Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems. 2008; 525-528
- [12] Lui Sha, Sathish G, Xue Liu, et al. Cyber physical systems: A new frontier [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. 2008; 1-9
- [13] Noble B D, Flinn J. Wireless, Self-organizing Cyber-Physical Systems[C]// Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. 2006
- [14] Huang Ching-ling, Raja S, Hariharan K. Design of Cooperative Vehicle Safety Systems Based on Tight Coupling of Communication, Computing and Physical Vehicle Dynamics[C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 159-167
- [15] Gregory H, Guo Wei-jun. Cyber-Physical Codesign of Distributed Structural Health Monitoring With Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 119-128
- [16] Silva A R, Vuran M C. (CPS)²: Integration of Center Pivot Systems with Wireless Underground Sensor Networks for Autonomous Precision Agriculture [C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 79-88
- [17] Faza A Z, Sedigh S. Reliability Modeling for the Advanced Electric Power Grid; A Proposal for Doctoral Research[C]// Proceedings of International Computer Software and Applications Conference. 2009; 672-675
- [18] Lin Jing, Sahra S, Ann M. Towards Integrated Simulation of Cyber-Physical Systems; A Case Study on Intelligent Water Distribution[C]// 8th IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC). 2009; 690-695
- [19] Llic M D, Le Xie, Khan U A, et al. Modeling Future Cyber-Physical Energy Systems[C]// IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008
- [20] Morris T H, Srivastava A K, Reaves B, et al. Engineering Future Cyber-Physical Energy Systems; Challenges, Research Needs, and Roadmap[C]// 41st North American Power Symposium. 2009
- [21] Gill H. From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems [C]// HCSS National Workshop on New Research Directions for High Confidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail. 2008
- [22] 徐文拴, 辛运帷, 卢桂章, 等. 普适计算系统架构的研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 246-249
- [23] Ding Nan, Ma Hong-lian. Research and application of LZW algorithm in embedded detection and control system[C]// 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. 2007; 2563-2566
- [24] Steven F, Robert B, Scott J, et al. Cloud computing beyond objects; Seeding the cloud[C]// Proceedings of the Conference on Object-oriented Programming Systems, Languages, and Applications. 2009; 847-850
- [25] Dai Yuan-shun. Autonomic computing and reliability improvement[C]// Proceedings of Eighth IEEE International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing. 2005; 204-206
- [26] Chen Tsung Teng, Yen D C. Technical research themes of the mobile ubiquitous computing[C]// 2009 8th International Conference on Mobile Business. 2009; 221-226
- [27] Chen Jiann-liang, Chao Han-chieh. IPv6: More than protocol for next generation Internet[J]. Computer Communications, 2006, 29(16): 3011-3012
- [28] Wen Yuan-bao, Chi chu-bing, Peng L W. Research on the soft-switch technology and quality of service in next generation network[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2003, 31(2): 4-6
- [29] Peterson L, Wroclawski J. Overview of the GENI Architecture [S]. GENI Design Document. 2006; 06-11
- [30] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [31] 康健, 左宪章, 唐力伟, 等. 无线传感器网络数据融合技术[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 31-35
- [32] Vicaire P A, Hoque E, Xie Zhi-heng, et al. Bundle: A Group Based Programming Abstraction for Cyber Physical Systems[C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 32-41
- [33] Lin Jing, Sedigh S, Miller A, et al. A General Framework for Quantitative Modeling of Dependability in Cyber-Physical Systems; A Proposal for Doctoral Research[C]// Proceedings of International Computer Software and Applications Conference. 2009; 668-671
- [34] Yun H, Liang Wu-po, Rahmaniheris M, et al. A Reduced Complexity Design Pattern for Distributed Hierarchical Command and Control System[C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 42-49
- [35] Lee E A. Cyber Physical Systems; Design Challenges[C] // Proceedings of 11th IEEE Symposium on Object/Component/Service-oriented Real-time Distributed Computing. 2008; 363-369
- [36] Al Omari H, Francis W, Christos P, et al. An Improved Algorithm to Smooth Delay Jitter in Cyber-Physical Systems[C]// International Conference on Scalable Computing and Communications-The 8th International Conference on Embedded Computing (ScalCom-EmbeddedCom). 2009; 81-86

- [37] Bujorianu M C, Bujorianu M L, Barringer H. A unifying specification logic for cyber-physical systems[C]//Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control & Automation, 2009; 1166-1171
- [38] Bujorianu M C, Barringer H. An integrated specification logic for cyber-physical systems[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, 2009; 291-300
- [39] Tan Ying, Vuran M C, Goddard S, et al. A Concept Lattice-based Event Model for Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber Physical Systems, 2010; 50-60
- [40] Huang J, Bastani F. Extending Service Model to Build an Effective Service Composition Framework for Cyber-Physical Systems[C] // IEEE International Conference on Service-oriented Computing and Applications, 2009; 130-137
- [41] Huang Jian, Bastani F, Ling Y I, et al. Toward a Smart Cyber-Physical Space: A Context-sensitive Resource-explicit Service Model[C] // Proceedings of International Computer Software and Applications Conference, 2009; 122-127
- [42] Wang Han-bo, Zhou Xing-she, Dong Yun-wei, et al. Modeling Timing Behavior for Cyber-Physical Systems[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering(CiSE 2009), 2009
- [43] Thacker R A, Jones K R, Myers C J, et al. Automatic Abstraction for Verification of Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, 2010; 12-21
- [44] Dabholkar A, Gokhale A. An Approach to Middleware Specialization for Cyber Physical Systems[C]//Proceedings of the the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2009; 73-79
- [45] Zhang Yuan-fang, Christopher G. Reconfigurable Real-time Middleware for Distributed Cyber-Physical Systems with Aperiodic Events[C]// Proceedings of The 28th International Conference on Distributed Computing Systems, 2008; 581-588
- [46] Ahmadu H, Tarek A. An Adaptive-reliability Cyber-Physical Transport Protocol for Spatio-temporal Data[C]// Proceedings of Real-time Systems Symposium, 2009; 238-247
- [47] Li Ke-wei, Liu Qing-wei, Wang Fu-rong, et al. Joint Optimal Congestion Control and Channel Assignment for Multi-radio MultiChannel Wireless Networks in Cyber-Physical Systems[C]// UICATC2009-Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing in Conjunction with the UIC'09 and ATC'09 Conferences, 2009; 456-460
- [48] Ahmadu H, Abdelzaker T F. Congestion Control for Spatio-temporal Data in Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, 2010; 89-98
- [49] Xia Feng, Ma Long-hua, Dong Jin-xiang, et al. Network QoS Management in Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia, 2008; 302-307
- [50] Kottenstette N, Karsai G, Sztipanovits J. A Passivity-based Framework for Resilient Cyber Physical Systems[C]// Proceedings of ISRCS 2009-2nd International Symposium on Resilient Control Systems, 2009; 43-50
- [51] Christopher Z, Balasubramanya B. Time-based Intrusion Detection in Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, 2010; 109-118
- [52] Crenshaw T L, Gunter E, Robinson C L, et al. The Simplex Reference Model: Limiting Fault-propagation due to Unreliable Components in Cyber-Physical System Architectures[C]// Proceedings of the 28th IEEE International Digital Object Identifier, 2007; 400-412
- [53] Xu Zhong, Liu Xue, Zhang Guo-qing, et al. A Certificateless Signature Scheme for Mobile Wireless Cyber-physical Systems[C]// Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing System Workshops, 2008; 489-494
- [54] Tang Han, McMillin B M. Security Property Violation in CPS Through Timing[C]// Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, 2008; 519-524
- [55] Ten C W, Liu C C, Govindarasu M. Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems[C] // Proceedings of the IEEE Transactions on Power Systems, 2008; 1836-1846
- [56] Zhang Y. Optimal Adaptive System of Health Monitoring and Diagnosis for Resource Constrained Cyber-physical Systems[C]// Proceedings of International Symposium on Software Reliability Engineering, 2009; 51-60
- [57] Chun I, Park J, Kim W, et al. Autonomic Computing Technologies for Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the International Conference on Advanced Communication Technology, 2010; 1009-1014
- [58] Woo H, Yi Jiang-liang, Browne J C. Design and Development Methodology for Resilient Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2008; 525-528
- [59] Cao Jie-rui, Li Huan. Energy-efficient Structuralized Clustering for Sensor-based Cyber-Physical Systems[C]// UIC-ATC 2009-Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing in Conjunction with the UIC'09 and ATC'09 Conferences, 2009; 234-239
- [60] Zhen S, Ram S C, Cihan T N, et al. Feasibility Analysis on Optimal Sensor Selection in Cyber-Physical Systems[C]// Proceedings of the American Control Conference, 2009; 5368-5373
- [61] Zhang Fu-min, Shi Zhen-wu. A dynamic battery model for code-sign in cyber-physical systems[C] // Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2009; 51-56
- [62] Cardenas A A, Amin S, Sastry S. Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems[C] // Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2008; 495-500